

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2022.09.015

山地气候背景下重庆地区 夏季气象条件对臭氧的影响^①

吉莉¹, 刘晓冉², 张新科³, 李强¹

1. 重庆市北碚区气象局, 重庆 400700; 2. 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147;
3. 重庆市荣昌区气象局, 重庆 402460

摘要: 为探讨山地气候背景夏季气象条件对臭氧(O₃)的影响, 利用 2013—2017 年重庆市北碚区 3 个环境监测站点日值数据集和相关气象要素资料, 运用综合数理统计方法, 对北碚区 O₃ 浓度的特征变化以及夏季气象条件对重庆北碚区 O₃ 的影响进行分析, 并通过 HYSPLIT 模型方法查找 O₃ 传输路径, 分析其潜在源区. 结果表明, 北碚区 O₃ 高浓度主要集中在 7 月下旬至 8 月, 且缙云山站点 O₃ 浓度最高. 夏季气象条件对 O₃ 污染有着密切的联系, 当日平均气温达到 30~35 ℃, 日极端最高气温在 35~40 ℃时, O₃ 超标率达到最高. 日照时数对 O₃ 浓度呈正相关性, 相对湿度、降水对 O₃ 浓度呈负相关性. 北碚区夏季 O₃ 污染输送较重的气团路径主要来自东北方以及东南方, 夏季 O₃ 污染高浓度主要受四川盆地成都周边城市群、重庆本地和贵州北部的影响.

关键词: 夏季; 气象条件; 臭氧; 影响研究; 潜在源区

中图分类号: X16

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2022)09-0099-12

On Influence of Summer Meteorological Conditions on Ozone under Background of Mountain Climate in Chongqing

JI Li¹, LIU Xiaoran², ZHANG Xinke³, LI Qiang¹

1. Weather Bureau in Beibei District of Chongqing City, Chongqing 400700, China;

2. Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147, China;

3. Weather Bureau in Rongchang District of Chongqing City, Chongqing 402460, China

Abstract: In order to understand deeply the impact of summer meteorological conditions on ozone in mountain climate background, the characteristics of ozone concentration in Beibei and the impact of summer meteorological conditions on ozone in Beibei, Chongqing, have been analyzed in this paper by means of the daily data sets (2013—2017) and relevant meteorological elements data of three environmental monitoring stations in Beibei, Chongqing. The ozone transport path and potential source area have also been analyzed based on hysplit model. The results show that the high concentration of ozone in Beibei is mainly concentrated in late July to August, and the highest concentration of ozone is in Jinyun Mountain. Ozone is close-

① 收稿日期: 2021-07-13

基金项目: 重庆市气象局业务技术攻关项目(YWJSGG-202134)资助.

作者简介: 吉莉, 高级工程师, 主要从事气象服务研究工作.

通信作者: 刘晓冉, 正高级工程师, 博士.

ly related to meteorological conditions in summer. When the daily average temperature reaches 30—35 °C, and the daily extreme maximum temperature reaches 35—40 °C, the ozone exceeding standard rate is the highest. Ozone concentration was positively correlated with sunshine hours, and negatively correlated with relative humidity and precipitation. In summer, the heavy ozone transport path in Beibei mainly comes from northeast and Southeast. The high concentration of ozone pollution in summer is mainly affected by the urban agglomeration around Chengdu in Sichuan Basin, Chongqing and Northern Guizhou.

Key words: summer; meteorological conditions; ozone; impact study; potential source area

近年来,在经济、社会的迅猛发展背景下,大量的能源被开发利用,城市空气污染越来越严重,对人们的生活和健康产生了较大的影响.作为城市空气主要污染物之一的臭氧(O₃),是一种光化学反应的微量气体,它主要来自大气层中氮氧化物和碳氢化合物等.近地面的 O₃ 主要来源于氮氧化物和挥发性有机化合物,在光照作用下发生的大气光化学反应以及平流层输入、前体物浓度水平、大气化学反应、气象条件和区域传输等对 O₃ 浓度都有一定的影响^[1].高浓度 O₃ 将严重威胁人类健康,还会对植物和农作物等造成危害^[2].

目前针对 O₃ 污染,国内外学者进行了大量的研究^[3-10].如:国外 Jacob 等^[11]的研究显示,未来几十年气候变化将会使污染地区夏季 O₃ 浓度增加,其中受影响最大的是城市地区;Sillman^[12]基于 10 年观测数据对 O₃ 与前体物 VOCs 和 NO_x 的关系进行研究,结果表明,在某些区域要达到降低 O₃ 浓度的效果,单独减少 VOCs 或者 NO_x 的排放浓度是不可行的,不同区域下有不同的影响机制;Antón 等^[13]利用 1978—2000 年的 NASA O₃ 总量的数据,对葡萄牙上空 O₃ 总量的时空结构进行研究得出,葡萄牙上空的 O₃ 总量与纬度有轻微的依赖关系,O₃ 浓度存在季节性显著变化.国内王旭东等^[1]基于郑州环境和气象数据,分析 O₃ 传输路径和潜在源区;Zhang 等^[14]使用后向轨迹和 PSCF 手段研究了杭州 O₃ 污染传输影响;王闯等^[15]利用 2013 年沈阳市 O₃ 数据和气象数据,分析气象条件对 O₃ 浓度的影响研究;高平等^[16]基于 2015 年 10 月广州 4 个代表不同站点类型,结合 WRF 模拟的气象数据,研究了各站点 O₃ 的变化特征、影响因素及敏感性.

重庆作为典型山地城市,受地形^[17]、南亚高压和西太平洋副高的共同影响,属于亚热带季风性湿润气候^[18],风速小,夏季高温多.目前关于重庆 O₃ 污染的研究取得了一些成果^[19-22],蒲茜等^[23]通过研究重庆市 O₃ 污染日的大气环流分型与传输特征,总结出 O₃ 污染期间主要有 8 种天气类型,主要污染来源有一个明显的从北转南的趋势,O₃ 污染的潜在源贡献分析结果与全市工业源 NO_x 和 VOCs 排放量空间分布的一致性较高.韩余等^[24]通过重庆市 O₃ 污染,对气象因子预报方法进行了对比研究.作为重庆市主城中心城区之一的北碚区,随着近年来的大气污染治理,空气质量持续改善,优良天数保持在主城区前列,但是空气质量受气象要素、环境污染等客观因素的影响,仍存在较大的环保压力,其中 O₃ 是严重影响空气质量的重要因素之一.为了强化源头治理,为此,有必要对山地气候背景下夏季 O₃ 污染进行深入研究.

1 资料与方法

1.1 资料来源

1.1.1 环境监测资料

本文数据包括 2013—2017 年 3 个北碚环境监测站点逐时的 O₃ 质量浓度,对比北碚环境监测站点环境信息(表 1),可知天生环境监测站点(本文简称天生站)相对其他 2 个监测站点海拔最低,人口密度略低于蔡家监测站点(本文简称蔡家站).缙云山监测站点(本文简称缙云山站)海拔最高,周边的绿化覆盖率最高.

表 1 环境监测站点环境信息

站点	海拔/m	人口密度/(人·km ⁻²)	绿化覆盖率/%
天生	247	2.8	65
蔡家	330	3.0	30.2
缙云山	910	0.01	97

1.1.2 气象观测资料

气象观测资料包括 2013—2017 年的北碚国家气象观测站平均气温(T)、最高气温($T_{\max}$)、相对湿度(H_R)、降水(R)、风向(WD)和风速(S_w)等常规气象观测数据,蔡家和缙云山区域自动站的平均气温(T)、最高气温($T_{\max}$)、降水(R)等常规气象观测数据. 由于天生站位于城区,在本文主要采用北碚国家气象观测站数据进行对比分析,蔡家气象数据则取蔡家站数据,缙云山气象数据则取缙云山山腰黛湖区域自动站数据.

1.2 研究区域

重庆市北碚区地处川东平行岭谷区,地形由窄条状山脉和丘陵谷地组成. 由西向东分布有沥鼻山、缙云山、中梁山、龙王洞山 4 条山脉,其间为宽缓的丘陵谷地. 山脉两侧地势陡峻,多形成陡坡和峻坡,山脊高程 700~1 000 m,最高峰为皮家山,高程为 1 312.1 m. 山脉之间宽阔的丘陵谷地相对低缓,丘顶高程 250~450 m,最低点为嘉陵江童家溪出境处 175 m. 属于立体气候中亚热带气候,北碚辖区多年平均气温为 14.9~18.1 $^{\circ}\text{C}$,日平均气温大于 10 $^{\circ}\text{C}$ 的积温在 6 000~6 500 $^{\circ}\text{C}$ 之间;年降水量为 1 000~1 300 mm;年平均日照时数在 1 100 h 左右. 具有冬暖夏热,春早秋短无霜期长,雨量丰沛,地区分布季节分配不均,风力小,湿度大,云雾多,日照少,秋季多绵雨,夏季多伏旱等特点.

1.3 研究方法

1.3.1 O_3 污染物浓度限值

环境空气质量与人类健康程度息息相关^[25],本研究依据《环境空气质量标准》2012 年版对 O_3 污染物质量浓度限值的定义(表 2), O_3 质量浓度超标均以日最大 8 h 平均质量浓度大于 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 为标准计算.

表 2 O_3 污染物浓度限值表

污染物	平均时间	质量浓度限制/ $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	
		一级	二级
O_3	日最大 8 h 平均	100	160
	1 h 平均	160	200

1.3.2 后向轨迹

美国国家海洋和大气管理局开发的 HYSPLIT(hybrid single particle lagrangian integrated trajectory)专业模式,主要用于大气计算和分析大气污染输送与扩散轨迹^[26]. 该模式主要应用于大气污染在各个地区的传输轨迹和扩散的研究^[27-29],是一个集输送、扩散和沉降的完整模式,可处理多种气象要素输入场、多种物理过程和不同类型污染物排放源. 本研究将重庆市北碚区缙云山监测点(29.83 $^{\circ}\text{N}$,106.38 $^{\circ}\text{E}$)作为起始点,模拟计算监测点 2013—2017 年夏季(6 月,7 月,8 月)2 时、8 时、14 时到 20 时(北京时间)48 h 后向轨迹,模拟起始高度设置为距离地面 500 m 高度^[14]. 然后使用 TrajStat 软件的 Angle Distance 算法对气团后向轨迹做聚类分析,研究气团输送路径.

1.3.3 潜在来源 PSCF 分析

潜在来源 PSCF 分析(potential source contribution function)方法是计算和描述可能潜在源区的空间地理位置的概率密度函数,可以识别对研究区域污染物影响大的区域. 浓度权重轨迹分析法(concentration-weighted trajectory, CWT)可以估算每个网格上污染物浓度. 结合两种方法可以较为准确地确定某地的污染物潜在源区.

$PSCF_{ij}$ 值定义为经过第 ij 网格的污染轨迹数 m_{ij} 和总轨迹数 n_{ij} 的比值, $PSCF_{ij}$ 值高的网格被解释为潜在源区,计算公式为:

$$PSCF_{ij} = m_{ij} / n_{ij}$$

(1)

为减少当某一网格中 n_{ij} 小于研究区域内每个网格内平均端点数 n_{ave} 在 3 倍时所导致 $PSCF_{ij}$ 值较高的

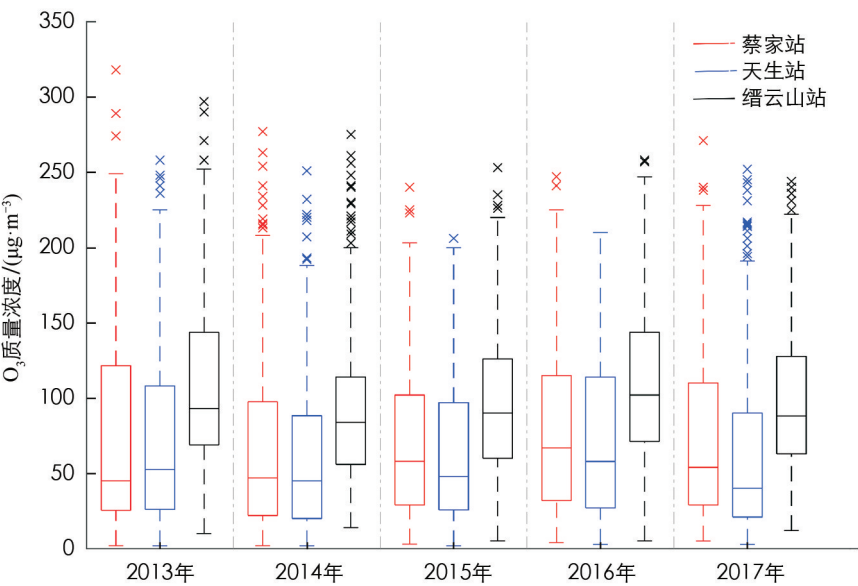
不确定性, 将 $PSCF_{ij}$ 值乘以权重函数 $W(n_{ij})$, 即 $WPSCF = W(n_{ij}) \times PSCF_{ij}$, 权重函数 W_{ij} 值^[30] 定义为:

$$W(n_{ij}) = \begin{cases} 1.0 & n_{ij} > 60 \\ 0.7 & 20 < n_{ij} \leq 60 \\ 0.42 & 10 < n_{ij} \leq 20 \\ 0.05 & n_{ij} \leq 10 \end{cases} \quad (2)$$

2 O₃ 质量浓度特征分析

2.1 O₃ 年际变化特征

图 1 为北碚区 3 个环境监测站点 2013—2017 年间 O₃ 日质量浓度最大值的年际变化箱线图. 从图 1 中整体来看, 缙云山站的值最高, 其次是蔡家站, 天生站值最低; 天生站与蔡家站的箱线下限(最低值)、下四分位、中位数线、上四分位都基本一致, 明显低于缙云山站, 天生站、蔡家站的中位数基本维持在 40~60 μg/m³, 而缙云山中位数维持在 80~100 μg/m³; 从箱线上限(最大值)来看, 3 个站点, 天生站近 5 年均是最低, 而蔡家站与缙云山站则大致相同, 两站之间的最大值差距较小.



箱线图中每个箱线的上缘、上边缘、中线、下边缘和下缘分别代表上限、上四分位、中位数、下四分位和下限, X 为异常值

图 1 2013—2017 年北碚区 O₃ 日质量浓度最大值年际变化箱线图

图 2 是 2013—2017 年北碚区 3 个监测站点 O₃ 日质量浓度最大值污染级别时间序列分布图. 从图 2 中可见 2013—2017 年北碚区 3 个监测站点, 除 2015 年 O₃ 高质量浓度时间跨度较大, 3 月—4 月开始出现高质量浓度天数外, 其余年份的 O₃ 高质量浓度天数基本集中在 7 月下旬至 8 月. 3 个站点 O₃ 质量浓度从高到低依次为缙云山站、蔡家站、天生站, 蔡家站和天生站两地相差不大, 缙云山站监测点 O₃ 质量浓度远高于其他两地. 对比表 1 环境监测站点环境信息分析可知, 主要是缙云山监测站点在海拔和绿化覆盖率明显高于其余 2 个站点, 有研究表明^[31] 植被排放的 VOCs 亦可增加大气光化学系统的活性, 自由基的增加容易加快 O₃ 的生存, 因此缙云山站的 O₃ 质量浓度明显高于其余 2 个站点.

2.2 O₃ 质量浓度逐月变化特征

由绘制的北碚区 2013—2017 年的 O₃ 质量浓度平均逐月变化图(图 3a)可知, 北碚区 3 个大气污染监测站点的逐月 O₃ 质量浓度变化呈单峰型, 峰值基本出现在 7 月, 低值基本出现在 12 月, 每年的 11 月次年 2 月 O₃ 质量浓度非常低. 在稳步上升的大趋势中, 各监测点在 4—6 月增幅较小. 北碚缙云山 O₃ 质量浓度远高于其他两地, 蔡家和天生两地趋势一致, O₃ 质量浓度相差不大.

从北碚区 3 个监测站日最大 8 h O_3 质量浓度月极端最大值变化图(图 3b)可以看出, 3 个监测站日最大 8 h O_3 质量浓度月极端最大值的变化趋势与月平均值(图 3a)基本一致, 11 月—2 月最低, 7 月 O_3 质量浓度最高; 除蔡家站 4 月 O_3 质量浓度最高外, 其余月份极端最大值均出现在缙云山监测点, 且蔡家站 5~8 月的极端最大值与缙云山站基本一致。

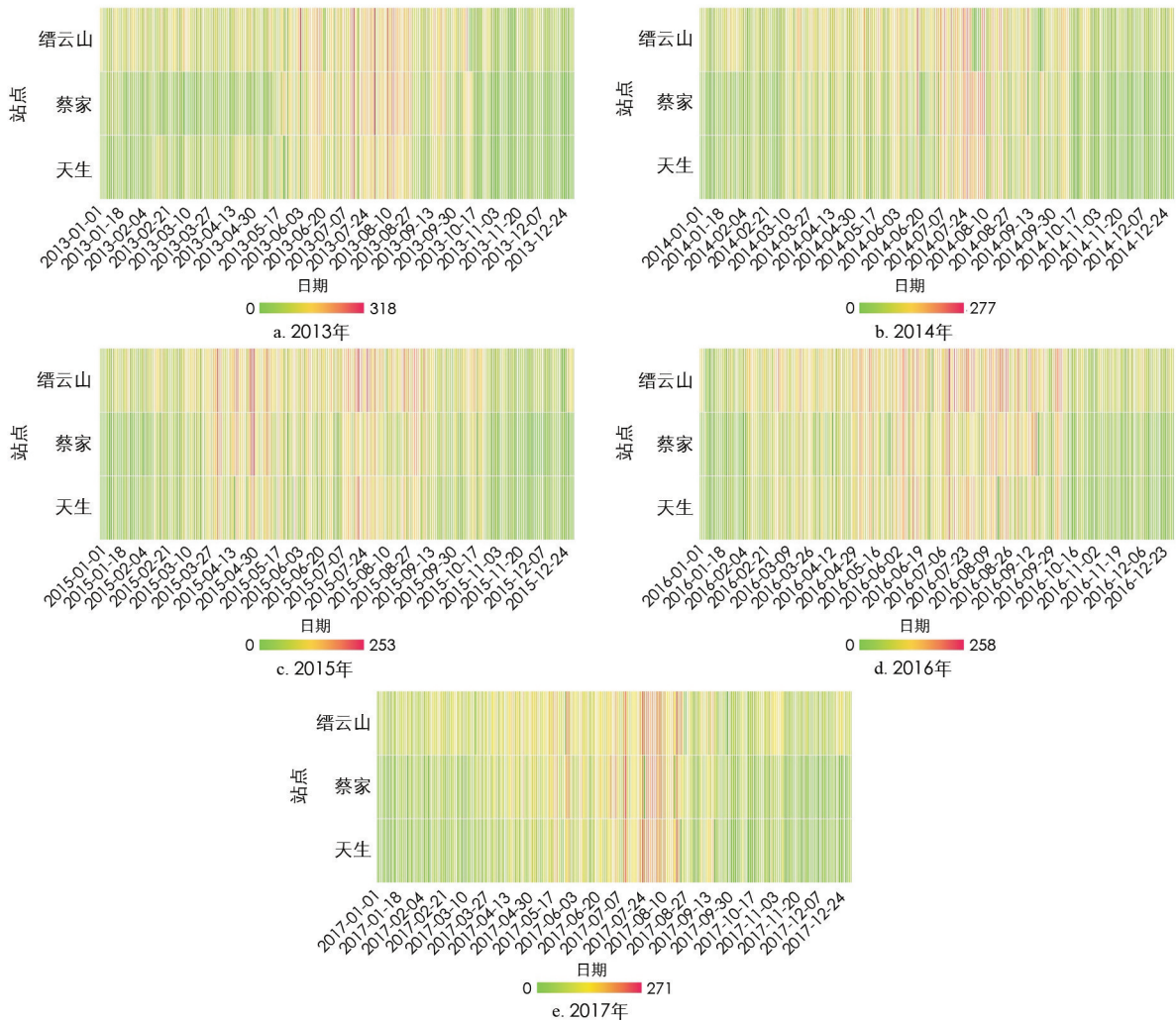


图 2 2013—2017 年北碚区 O_3 日质量浓度最大值污染级别时间序列分布

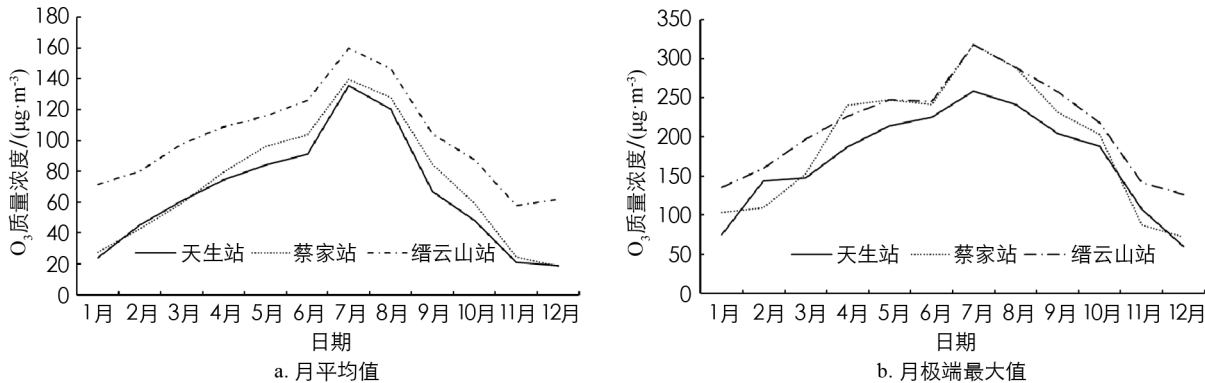


图 3 2013—2017 年北碚区 O_3 质量浓度逐月变化图

图 4 是 2013—2017 年北碚区 O_3 日最大 8 h 浓度超标平均天数逐月分布图, 从图 4 中可见除缙云山站 2 月开始有平均 1d 的浓度超标日数外, 天生站和蔡家站均最早开始于 4 月; 3 个站质量浓度超标日数一般结束于 10 月; 秋末冬季均未出现超标现象; 7 月、8 月是 O_3 质量浓度超标日数最多的月份, 其中缙云山站 7 月平均超标日数为 18.8 d, 8 月为 14.4 d, 7—8 月天生站和蔡家站超标日数均在 10 d 左右.

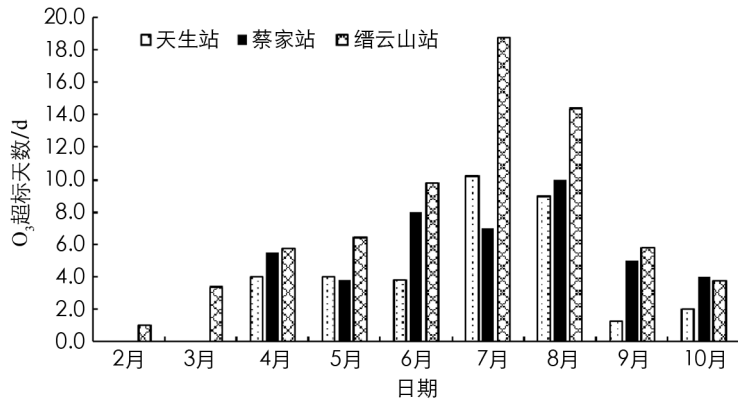


图 4 2013—2017 年北碚区 O_3 日最大 8 h 质量浓度超标平均天数逐月分布

2.3 O_3 质量浓度逐日变化特征

图 5 是 2013—2017 年北碚地区 O_3 质量浓度日变化图, 从图 5a 可见北碚区总体平均 O_3 质量浓度日变化呈现上午质量浓度低, 1 d 的最大值出现时间在 20:00 时左右, 之后逐渐回落. 各监测点呈现一致的变化趋势, 天生站和蔡家站在 19:00—20:00 时达到 1 d 的最大值, 缙云山站在 22:00 时达到最大值. 缙云山站平均 O_3 质量浓度最大, 蔡家站和天生站每天平均 O_3 质量浓度相差不大, 较缙云山站相差 $40\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右.

图 5b 是 2013—2017 年夏季 6—8 月平均北碚区 O_3 质量浓度日变化图. 从图 5b 中可见, 夏季 O_3 质量浓度逐时变化与年平均变化基本一致, 1 小时 O_3 质量浓度从高到低依次为缙云山站、蔡家站、天生站, 日最高峰值与年平均变化也基本一致, 随着太阳辐射的增加, 在 11:00 时左右, O_3 质量浓度也随之逐渐增大, 大约在 19:00—21:00 时, 达到日最大值; 但是夏季蔡家站 1 小时 O_3 质量浓度从 14:00 时起增长速度较快, 在 18:00 时与天生站的 O_3 质量浓度差值达到 $23.2\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, 只低于缙云山站 $6.4\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$.

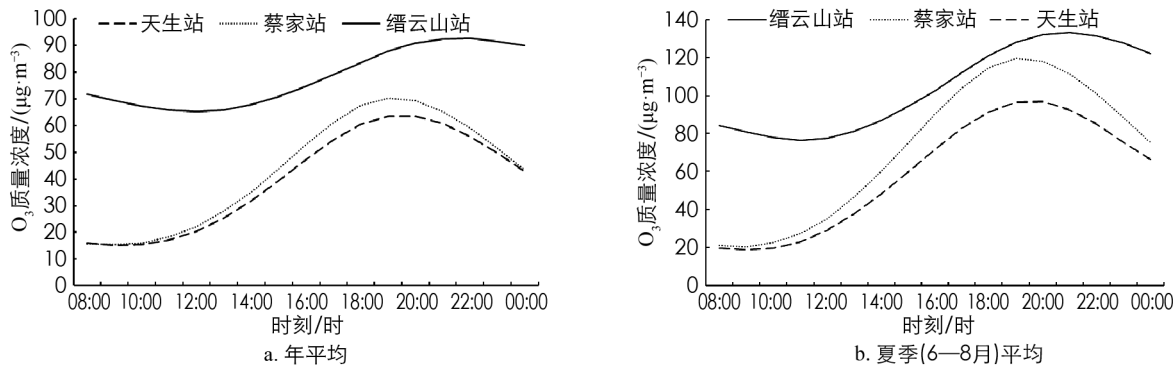


图 5 2013—2017 年北碚区 O_3 质量浓度日变化

3 夏季 O_3 与气象条件的关系

国内外大量学者对 O_3 的研究结论表明^[32-34], 近地面 O_3 浓度变化受气象条件的影响较大, 在 O_3 的形成、传输、沉降和消散的过程中气象条件都有重要的作用. 由于北碚区 O_3 污染最严重的季节主要出现在夏季, 为更好地研究气象条件对 O_3 发展的影响, 本研究主要选取 2013—2017 年夏季(6—8 月)的 O_3 数据及同期气象数据进行分析.

3.1 气温

统计对比 3 个环境监测站点不同气温范围(平均气温、日极端最高气温)对应 O₃ 质量浓度及其超标率的情况(表 3)可见, 天生站位于城区, 在平均气温>35 ℃ 的情况下, 无 O₃ 超标日数, 3 个站 O₃ 超标主要集中在 25~35 ℃ 之间, 其中 30 ℃<T≤35 ℃ 超标率最高, 分别达到 61.6%, 51.5%, 50.3%, O₃ 日最大质量浓度也是在日平均气温 4 级范围中最高的; 日极端最高气温 4 个范围, 3 个站均有超标日数, O₃ 超标主要集中在 35 ℃<T_{max}≤38 ℃ 和 38 ℃<T_{max}≤40 ℃ 之间, 除天生站超标率最高出现在 38 ℃<T_{max}≤40 ℃ 之间外, 其余 2 个站超标率最高的范围在 35 ℃<T_{max}≤38 ℃ 之间, 在日极端最高气温超过 40 ℃ 的情况下, O₃ 超标率从高到低依次为蔡家站、缙云山站、天生站.

表 3 2013—2017 年不同气温范围对应 O₃ 质量浓度及其超标率情况

站点	气象要素	要素区间值 范围/℃	O ₃ 超标 天数/d	日平均 O ₃ 质量 浓度/(μg/m ⁻³)	日最大 O ₃ 质量 浓度/(μg/m ⁻³)	O ₃ 超标率 /%
天生	日平均气温(T)	T<25	2	204	225	1.8
		25<T≤30	41	183	251	36.6
		30<T≤35	69	192	258	61.6
		T>35	0	0	0	0.0
	日极端最高气温(T _{max})	T _{max} <35	25	180	225	22.3
		35<T _{max} ≤38	35	192	251	31.3
		38<T _{max} ≤40	37	192	252	33.0
		T _{max} >40	15	158	258	13.4
蔡家	日平均气温(T)	T<25	2	211	236	1.5
		25<T≤30	60	187	247	44.8
		30<T≤35	69	198	318	51.5
		T>35	3	253	289	2.2
	日极端最高气温(T _{max})	T _{max} <35	31	184	241	23.1
		35<T _{max} ≤38	32	195	248	23.9
		38<T _{max} ≤40	23	192	271	17.2
		T _{max} >40	48	164	318	35.8
缙云山	日平均气温(T)	T<25	4	194	246	2.3
		25<T≤30	77	195	297	44.5
		30<T≤35	87	200	297	50.3
		T>35	5	226	245	2.9
	日极端最高气温(T _{max})	T _{max} <35	40	191	297	23.1
		35<T _{max} ≤38	51	197	258	29.5
		38<T _{max} ≤40	29	220	261	16.8
		T _{max} >40	53	203	297	30.6

3.2 日照和相对湿度

日照时数是指一天内太阳直射光线照射地面的时间, 在一定程度反应了太阳辐射对 O₃ 质量浓度的影响, 日照时数越长, 越有利于提高光反应速度, 从而加快 O₃ 的生成^[33]. 从表 4 可见, 天生无日照时, 相应

地也无 O₃ 超标日数. 但随着日照时数的增加, O₃ 超标天数也在逐渐增加, 当日照达到 8~10 h 之间时, O₃ 超标率达到 36.6%. 因此, 近地面的 O₃ 质量浓度与日照时数有明显的正相关性.

大气中水汽通过影响太阳辐射从而影响 O₃ 发生光化学反应, 大气中的水汽在一定的条件下通过反应消耗 O₃^[35]. 由绘制的 2013—2017 年相对湿度及 O₃ 质量浓度散点图(图 6)可知, 随着相对湿度的增加, O₃ 质量浓度逐渐减少. 结合北碚区不同湿度区间下的 O₃ 质量浓度及超标率(表 4)可知, 在 O₃ 质量浓度超标日数里的相对湿度主要集中在 50%~80%之间, 其中相对湿度在 70%~80%之间, 超标率最高, 相对湿度≤50的超标率最低.

表 4 2013—2017 年天生站不同日照及相对湿度范围对应 O₃ 质量浓度及其超标率情况

气象要素	要素区间 值范围	O ₃ 超标 天数/d	平均 O ₃ 质量浓度 /(μg·m ⁻³)	日最大 O ₃ 质量浓度 /(μg·m ⁻³)	O ₃ 超标率 /%
日照时数	0 h	0	0	0	0
	5 h	11	179	216	9.8
	5~8 h	26	181	243	23.2
	8~10 h	41	197	252	36.6
	>10 h	34	190	258	30.4
相对湿度	≤50%	2	216	231	1.8
	50%~60%	20	184	252	17.9
	60%~70%	37	188	258	33.0
	70%~80%	46	195	251	41.1
	>80%	7	198	246	6.3

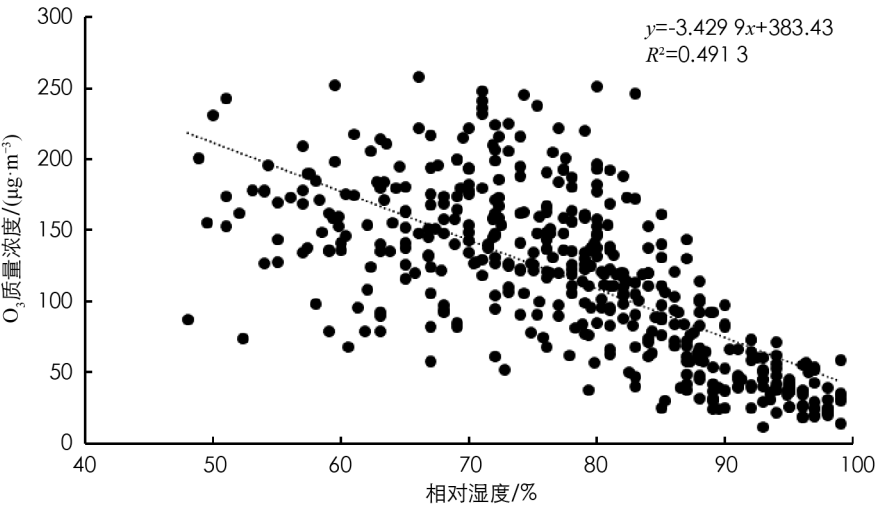


图 6 2013—2017 年相对湿度及 O₃ 质量浓度散点图

3.3 降水

统计 2013—2017 年 3 个监测站点不同降水范围对应 O₃ 质量浓度及其超标率情况(表 5)可知, O₃ 超标日主要是在无降水日出现, 超标率达 89%左右, 在中雨和大雨量级时, 天生站无 O₃ 超标日, 蔡家站和缙云山站的超标率 1%左右, 小雨量级则 3 个站都有 O₃ 超标情况出现, 超标率从大到小排列依次是蔡家站、天生站、缙云山站.

表 5 2013—2017 年不同降水范围对应 O₃ 质量浓度及其超标率情况

站点	项目	R 等级					
		R=0	R=0.1	0.1<R≤1.0	1.0<R≤10	10<R≤25	R>25
天生	超标天数/d	100	4	4	4	0	0
	平均 O ₃ 质量浓度/(μg·m ⁻³)	191	215	181	194	0	0
	日最大 O ₃ 质量浓度/(μg·m ⁻³)	258	215	191	222	0	0
	超标率/%	89.3	3.6	3.6	3.6	0	0
蔡家	超标天数/d	116	2	6	7	1	2
	平均 O ₃ 质量浓度/(μg·m ⁻³)	196	194	219	184	165	216
	日最大 O ₃ 质量浓度/(μg·m ⁻³)	318	228	254	214	165	223
	超标率/%	86.6	1.5	4.5	5.2	0.7	1.5
缙云山	超标天数/d	155	2	6	6	3	1
	平均 O ₃ 质量浓度/(μg·m ⁻³)	199	215	191	191	206	196
	日最大 O ₃ 质量浓度/(μg·m ⁻³)	297	233	231	209	261	196

3.4 风向和风速

结合天生站夏季不同风向风速变化及日最大 O₃ 质量浓度的风玫瑰图(图 7), 可以看出, 天生站2013—2017 年间夏季主要以北风、东北风为主, 平均风速 1.3 m/s, 最小风速 0.1 m/s, 最大风速 4.5 m/s, O₃ 质量浓度受风向的影响, 中心城区 O₃ 质量浓度较高, O₃ 质量浓度向西北方扩散的面积较大.

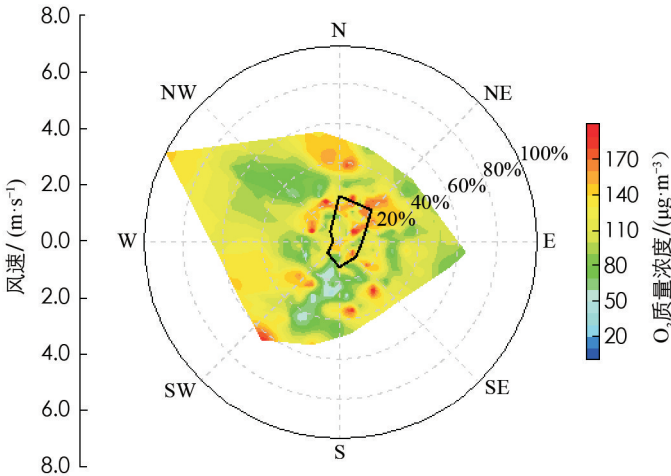


图 7 2013—2017 年夏季 O₃ 质量浓度与风向风速风玫瑰图

4 O₃ 来源模拟分析

4.1 夏季 O₃ 48 h 气团后向轨迹的变化轨迹

受气象和前体物等因素的影响的同时, O₃ 质量浓度也受污染物区域传输以及传输过程中前体物的光化学反应的重要影响^[36]. 本研究将重庆市北碚区缙云山监测点(29. 83°N, 106. 38°E)作为起始点, 模拟计算监测点 2013—2017 年夏季(6 月, 7 月, 8 月)02:00 时、08:00 时、14:00 时到 20:00 时(北京时间)48 h 后向轨迹, 模拟起始高度设置为距离地面 500 m 高度. 然后使用 TrajStat 软件对气团后向轨迹做聚类分析(表 6), 绘制气团输送路径(图 8). 结果显示, 北碚区缙云山夏季 O₃ 气团传输路径聚类后有 6 条轨迹, 平均 O₃ 质量浓度是 104. 8 μg/m³, 其中轨迹 1(19%)主要来自西方, 途经四川内江附近, 气团长度最短; 轨迹 2(19%)

相比轨迹 1 传输路径较长,主要来自南方,途经广西、贵州;轨迹 3(5%)气团长度最长,主要来自西方,途经青海、四川,同时此条轨迹的 O₃ 质量浓度最高,平均浓度达 128.9 μg/m³;轨迹 4(24%),O₃ 质量浓度位居全部轨迹线路的第 2,达到 110.97 μg/m³,主要来源于重庆东南部影响;轨迹占比最高的是轨迹 5(28%),平均 O₃ 质量 100.9 μg/m³,主要来源于东北方,与北碚区主要风向一致,途经四川盆地东北部;轨迹 6(5%)O₃ 质量浓度最低,平均 O₃ 质量浓度 87.13 μg/m³,主要来源于西南方,途经云南、贵州。

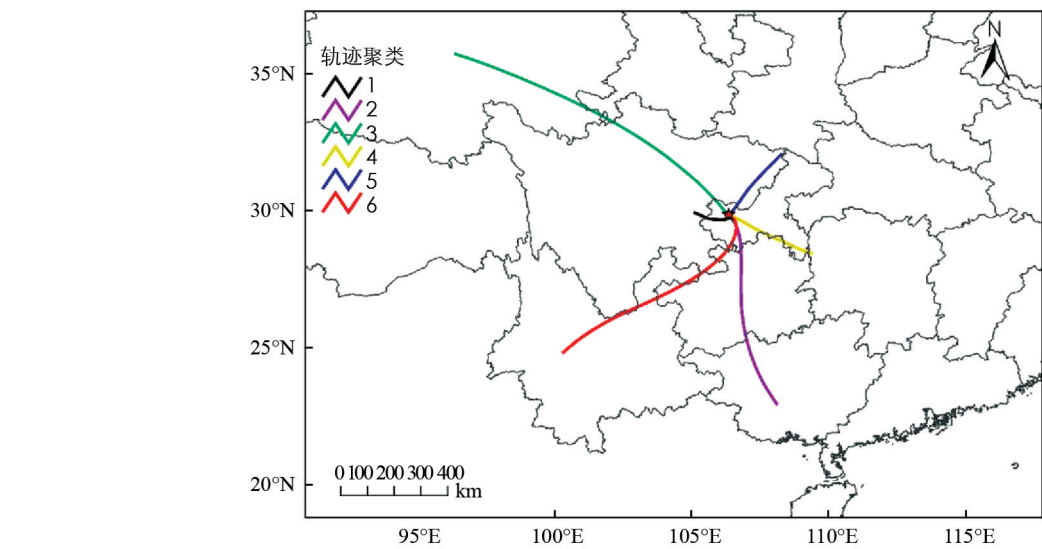


图 8 北碚缙云山夏季 O₃48 h 气团后向轨迹的变化轨迹

表 6 夏季 O₃ 的后继轨迹聚类结果和对应的平均 O₃ 质量浓度

轨迹类型	轨迹条数	平均 O ₃ 质量浓度/(μg·m ⁻³)	标准差
1	587	103.49	42.39
2	590	102.32	51.34
3	148	128.93	37.55
4	725	110.97	50.56
5	849	100.90	41.16
6	150	87.13	44.81

4.2 O₃ 污染潜在源区分析

本研究将后向轨迹所覆盖的空间区域(20°~40°N, 90°~120°E)网格化为 0.25°×0.25°的网格,设定轨迹对应的 O₃ 质量浓度大于 160μg/m³ (国家二级标准)作为污染轨迹,计算每个网格内的 PSCF 值以及 CWT 值. 由北碚缙云山夏季 O₃ 潜在源区分布概率(WPSCF)分析结果(图 9a),可知夏季 O₃ 潜在源区分布广泛,重庆东南部,贵州东北部、中部等地区是 WPSCF 高值区(>0.24),湖南、广西等地部分网格也存在较高的 WPSCF 值,可能是 O₃ 潜在源区。

基于 CWT 对研究区的 WPSCF 和加权浓度权重轨迹值(WCWT)进行进一步分析发现,两者结果较为相似,WPSCF 的大值区和 WCWT 大值区基本重合,潜在污染源较为可靠. 从北碚缙云山夏季 O₃ 质量浓度的 WCWT 分析结果(图 9b)可知,夏季 O₃ 污染潜在源高值区主要位于四川盆地成都周边城市群、重庆本地(除东北的城口—巫溪—巫山外的城市)、贵州北部,对北碚缙云山 O₃ 质量浓度 48 h 贡献超过了 100 μg/m³.

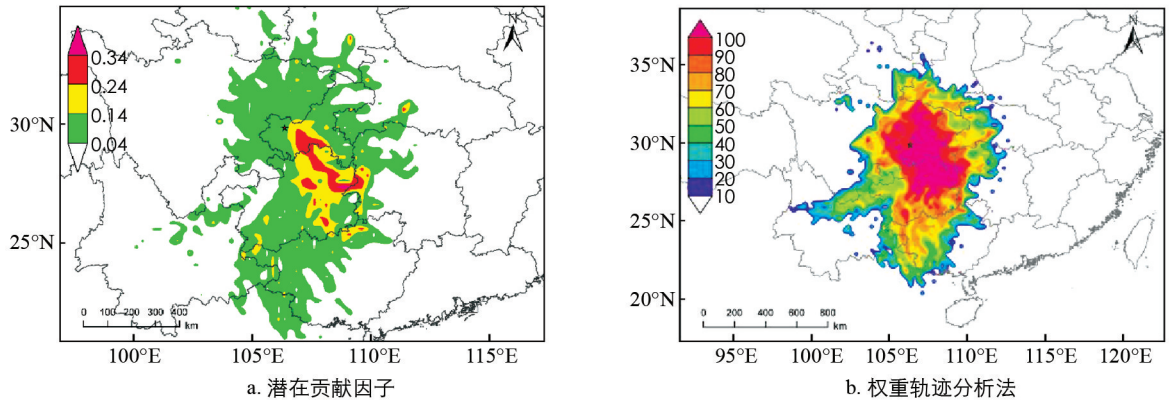


图 9 北碚区缙云山夏季 O_3 质量浓度潜在源分析结果

5 小结

- 1) 北碚区 O_3 质量浓度从高到低依次为: 缙云山站、蔡家站、天生站, 高 O_3 质量浓度主要集中在 7 月下旬到 8 月, 11 月到次年 2 月浓度最低, 天生站和蔡家站小时 O_3 质量浓度在 19:00—20:00 时达到最大, 缙云山站则在 22:00 时达到最大值。
 - 2) 气象条件对夏季 O_3 有密切的影响, 当日平均气温在 30~35 °C 区间时、日极端最高气温达到 35~40 °C 时, O_3 超标率最高; O_3 质量浓度与日照时数呈正相关性, O_3 质量浓度随着日照时数的增加而增加; 与相对湿度、降水呈负相关性, 随着湿度及降水的增加, O_3 质量浓度逐渐减少; 夏季主要以北风、东北风为主, 受风向的影响, 中心城区浓度较高, O_3 质量浓度向西北方扩散的面积较大。
 - 3) 对北碚区夏季 O_3 污染输送较重的气团路径主要来自东北方以及东南方。夏季 O_3 污染潜在源高值区主要位于四川盆地成都周边城市群、重庆本地(除东北的城口—巫溪—巫山外的城市)、贵州北部。
- 综上所述, O_3 是二次生成的光化学污染物, O_3 生成和积累的时间主要集中在白天, 而重庆夏季典型的 O_3 污染日大气环流就是高空处于青藏高原前部, 低层大气稳定, 850 hPa 处于低压西北侧^[23], 天气多为晴朗少云, 辐射强, 日照时间长, 非常有利于 O_3 光化学反应。因此, 北碚夏季气象条件对 O_3 的影响较为明显。

参考文献:

- [1] 王旭东, 尹沙沙, 杨健, 等. 郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析 [J]. 环境科学, 2021, 42(2): 604-615.
- [2] MOURA B B, ALVES E S, MARABESI M A, et al. Ozone Affects Leaf Physiology and Causes Injury to Foliage of Native Tree Species from the Tropical Atlantic Forest of Southern Brazil [J]. Science of the Total Environment, 2018, 610-611: 912-925.
- [3] 白建辉, 王明星, JOHN GRAHAM, 等. 鼎湖山臭氧、氮氧化物和太阳可见光辐射相互关系的研究 [J]. 环境科学学报, 2000, 20(2): 173-178.
- [4] 孔琴心, 刘广仁, 李桂忱. 近地面臭氧浓度变化及其对人体健康的可能影响 [J]. 气候与环境研究, 1999, 4(1): 61-66.
- [5] 肖辉, 沈志来, 黄美元, 等. 我国西南地区地面和低层大气臭氧的观测分析 [J]. 大气科学, 1993, 7(5): 621-628.
- [6] RAFIQ L, TAJBAR S, MANZOOR S. Long Term Temporal Trends and Spatial Distribution of Total Ozone Over Pakistan [J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing & Space Science, 2017, 20(2): 295-301.
- [7] MICHAEL R, O'LENICK C R, MONAGHAN A, et al. Application of Geostatistical Approaches to Predict the Spatio-Temporal Distribution of Summer Ozone in Houston, Texas [J]. Journal of exposure science & environmental epidemiology, 2019, 29(6): 806-820.
- [8] 刘建, 吴兑, 范绍佳, 等. 前体物与气象因子对珠江三角洲臭氧污染的影响 [J]. 中国环境科学, 2017, 37(3): 813-820.
- [9] 吴锴, 康平, 王占山, 等. 成都市臭氧污染特征及气象成因研究 [J]. 环境科学学报, 2017, 37(11): 4241-4252.
- [10] 王磊, 刘端阳, 韩桂荣, 等. 南京地区近地面臭氧浓度与气象条件关系研究 [J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1285-1296.

- [11] JACOB D J, WINNER D A. Effect of Climate Change on Air Quality [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(1): 51-63.
- [12] SILLMAN S. The Relation Between Ozone, NO_x and Hydrocarbons in Urban And Polluted Rural Environments [J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(12): 1821-1845.
- [13] ANTÓN M, BORTOLI D, COSTA M J, et al. Temporal and Spatial Variabilities of Total Ozone Column Over Portugal [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(3): 855-863.
- [14] ZHANG G, XU H H, QI B, et al. Characterization of Atmospheric Trace Gases and Particulate Matter in Hangzhou, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(3): 1705-1728.
- [15] 王闯, 王帅, 杨碧波, 等. 气象条件对沈阳市环境空气臭氧浓度影响研究 [J]. 中国环境监测, 2015, 31(3): 32-37.
- [16] 高平, 庄立跃, 王龙, 等. 广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子 [J]. 环境科学, 2020, 41(8): 3527-3538.
- [17] 芦华, 吴钰, 刘伯骏, 等. 空气质量模式在重庆主城区预报效果检验订正 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(7): 176-184.
- [18] 王棚飞. 重庆市主城区大气污染现状评价及影响因素分析 [D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [19] 黄伟, 刘芮伶, 李灵, 等. 重庆近地面臭氧污染与气象条件关系 [J]. 资源节约与环保, 2020(9): 129-131.
- [20] 刘姣姣, 叶堤, 刘芮伶. 重庆市臭氧污染特征研究 [J]. 环境科学与管理, 2020, 45(9): 59-62.
- [21] 肖艳平, 陈清莉, 郑森元, 等. 江津区城区大气臭氧分布特征与相关影响因素研究 [J]. 绿色科技, 2020(16): 33-35.
- [22] 刘美玲, 罗克菊, 陈诚, 等. 北碚区臭氧浓度与气象因素相关性分析研究 [J]. 资源节约与环保, 2020(1): 34.
- [23] 蒲茜, 李振亮, 张悦, 等. 重庆市 O₃ 污染日的大气环流分型与传输特征 [J]. 中国环境科学 2021, 41(1): 18-27.
- [24] 韩余, 周国兵, 陈道劲, 等. 重庆市臭氧污染及其气象因子预报方法对比研究 [J]. 气象与环境学报, 2020, 36(4): 59-66.
- [25] 高郅, 卢杰, 李江荣, 等. 林芝市主城区典型生态用地空气质量评价 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2020, 45(1): 130-137.
- [26] DRAXLES R R, HESS G D. An Overview of the HYSPLIT-4 Modelling System for Trajectories Dispersion and Deposition [J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, 47(4): 295-308.
- [27] 黄健, 颜鹏, DRAXLER R R. 利用 HYSPLIT_4 模式分析珠海地面 SO₂ 浓度的变化规律 [J]. 热带气象学报, 2004, 18(4): 407-414.
- [28] 王芳, 陈东升, 程水源, 等. 基于气流轨迹聚类的大气污染输送影响 [J]. 环境科学研究, 2009, 22(6): 637-642.
- [29] 王茜. 利用轨迹模式研究上海大气污染的输送来源 [J]. 环境科学研究, 2013, 26(4): 357-363.
- [30] DIMITRIOU K, KASSOMENOS P. COMBINING AOT, Angstrom Exponent and PM Concentration Data, with PSCF Model, to Distinguish Fine and Coarse Aerosol Intrusions in Southern France [J]. Atmospheric Research, 2016, 172-173: 74-82.
- [31] 韩志伟, 张美根, 胡非. 生态 NMHC 对臭氧和 PAN 影响的数值模拟研究 [J]. 环境科学学报, 2002, 22(3): 273-278.
- [32] 谈建国, 陆国良, 耿福海, 等. 上海夏季近地面臭氧浓度及其相关气象因子的分析和预报 [J]. 热带气象学报, 2007, 23(5): 515-520.
- [33] 钱悦, 许彬, 夏玲君, 等. 2016—2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析 [J]. 环境科学, 2021, 42(5): 2190-2201.
- [34] 翁佳烽, 梁晓媛, 邓开强, 等. 不同季节肇庆市 PM_{2.5} 和 O₃ 污染特征及潜在源区分析 [J]. 环境科学研究, 2021, 34(6): 1306-1317.
- [35] 曹庭伟, 吴锴, 康平, 等. 成渝城市群臭氧污染特征及影响因素分析 [J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1275-1284.
- [36] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系 [J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2041-2051.